

水中振動試験に基づく減衰比を適用した BWR 使用済燃料貯蔵ラック耐震評価

Seismic evaluation of BWR Spent Fuel Storage Racks using actual damping by vibration test in Water

日立 GE ニュークリア・エナジー(株)	山崎 寛人	Hiroto YAMASAKI
東京電力(株)	折田 修一	Syuichi ORITA
日立 GE ニュークリア・エナジー(株)	岩倉 成良	Shigeyoshi IWAKURA
日立 GE ニュークリア・エナジー(株)	今岡 哲男	Tetsuo IMAOKA
日立 GE ニュークリア・エナジー(株)	奥村 和恵	Kazue OKUMURA
(株)日立製作所	浪田 芳郎	Yoshio NAMITA

Damping value for BWR spent fuel storage racks has been used 1 percent damping, which is applied to welded steel structures in air as defined JEAG4601. However, it is considered that the actual damping is higher than that of the above mentioned, because of its underwater installation. This report shows the actual damping value of the Check Arrayed Rack by vibration test in water and Evaluation by the analysis of rack using actual damping.

Keywords: Spent Fuel, Storage Rack, Seismic Design, Damping, Fluid-structure Interaction, Virtual Mass

1. 緒言

現行の設計規格では、燃料貯蔵プール内に設置される BWR 使用済燃料貯蔵ラックの設計用減衰定数は、気中における溶接構造物と同等の 1%を用いている。しかし、現実的には、水中での流体連成効果やラックと使用済燃料体とのガタなどによる減衰効果が存在することが知られている。実際にそれらの減衰効果を把握するため、水を張った水槽内に実機燃料ラックを設置し、振動試験を実施した。

本研究では、振動試験により取得した現実的なラックの減衰比と、これらの現実的な減衰定数を用いた実機燃料ラックの耐震評価の例として応力評価を報告する。

2. 試験方法

2.1 試験体

使用済燃料貯蔵ラックは、使用済の燃料体をセル内に格納して、水を張った燃料プール内に設置される。複数の型式が存在するが、Fig.1 に示す角管市松配列型ラック（市松ラック）を試験体の代表型式として選定した。市松ラックは装荷できる燃料体数によりいろいろなタイプがあるが、流体による付加減衰効果が最も小さくなると考えられる最小体数のラックを選定した。選定したラックの燃料体数は 50 体（5 列×10 列）である。

実機の燃料プール内に設置されている状態を模擬するために試験水槽中にラックを設置し、水中の条

件とした。水槽の大きさは、流体による付加減衰効果が最も小さくなると考えられる無限水中と同等となる最小の大きさとし、高さは水の自由表面の影響が小さくなるようにラック先端から水の自由表面までの距離が十分取れる高さとした。

試験は、つくば市の防災科学技術研究所の振動台（最大搭載質量 500t、寸法：14.5m×15m）にて実施した^[1]。試験体の設置状況を Fig.2 に、試験を実施した振動台及び試験状況を Fig.3 に示す。

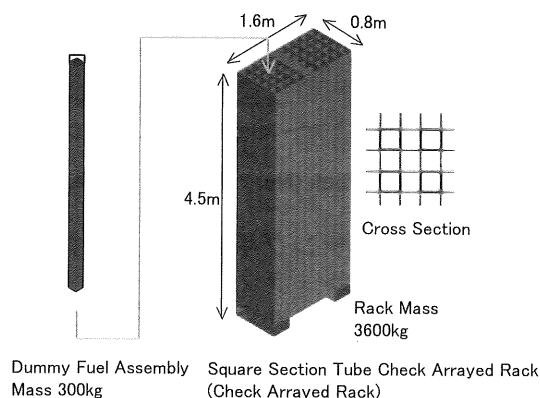


Fig. 1 Test Rack

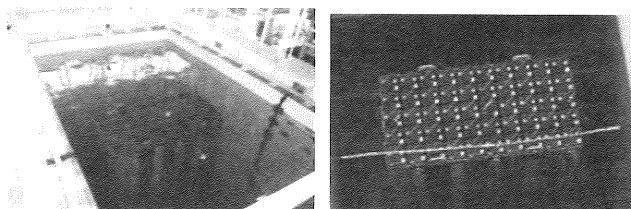


Fig.2 Test Rack set in Water

連絡先: 山崎 寛人,
日立 GE ニュークリア・エナジー(株)
〒319-1221 住所茨城県日立市大みか町 5-2-2,
E-mail: hiroto.yamasaki.kb@hitachi.com

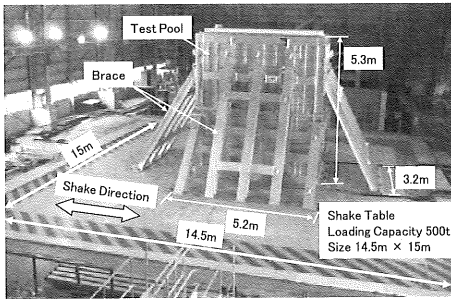


Fig. 3 Over View of Test Apparatus

2.2 試験ケース

(1) 振動特性把握試験

振動特性把握試験では、ラックの長辺方向及び短辺方向それぞれについて、ランダム波加振及び正弦波掃引加振を実施し、ラックの振動特性（固有振動数、振動モード、減衰比）を把握した。加振レベルは試験体が弾性範囲内となるレベルとした。試験パラメータとして水の有無、燃料体数を設定し、流体付加減衰、燃料体衝突減衰の影響を把握した。加振レベルによる減衰の傾向を確認するため、各試験パラメータにおいて加振レベルを変えて試験を実施した。

(2) 地震波加振試験

地震波加振試験では、試験体の応力条件が最も厳しい水中燃料体 100%挿荷条件に対して地震波加振を実施し、取得した減衰比や付加質量等の妥当性を確認するデータを取得した。

3. 試験結果

市松ラックの試験で得られた伝達関数に対してハーフパワー法を適用して求めた減衰比のうち、最大加振レベルでの水中の市松ラック減衰を Fig.4 に示す。また、水中燃料体 100%挿荷条件において、加振レベルを変えた場合の減衰比の傾向について Fig.5 に示す。短辺方向の場合、気中、燃料体無での減衰比は 1.1%であり、水中、燃料体無になると流体付加減衰効果により 5.1%と減衰比が大きくなるのがわかる。また、水中で燃料体が 50%、100%と増加するに従って、燃料体の衝突による減衰の増加により減衰比が増加することがわかる。長辺方向の場合も短辺方向の場合と同様に、気中から水中となることによって、流体付加減衰効果で減衰比が増加し、燃料体が増加すると燃料体の衝突により減衰比が大きくなるのがわかった。

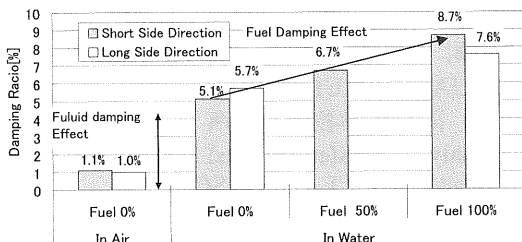


Fig. 4 Damping Ratio by Sine Sweep Test (Check Arrayed Rack, Maximum Excitation Level)

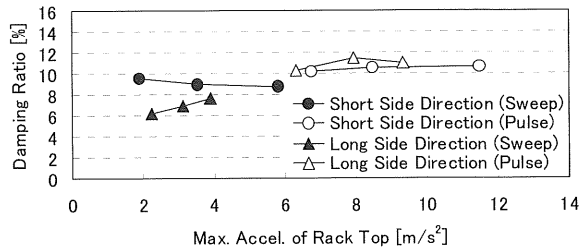


Fig. 5 Relation between Damping Ratio and Response Acceleration (Check Arrayed Rack)

4. 試験結果の解析・評価

4.1 水中構造物の振動特性

ラックのような水中構造物の地震時の運動方程式は以下ようになる^[2]。

$$(M_1 + M_{11})\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = -(M_1 + M_{11} + M_{12})\ddot{u}_g \quad (1)$$

ここで、

M_1 : 構造物の質量、 M_{11} : 自己付加質量、 M_{12} : 相互付加質量 (負の値をとる。)、 C : 構造物の減衰係数、 K : 構造物の剛性、 x : 構造物の変位、 u_g : 地震変位、 \cdot : 時間微分

式(1)の両辺を $M_1 + M_{11}$ で除すことにより次式を得る。

$$\ddot{x} + \frac{C}{M_1 + M_{11}}\dot{x} + \frac{K}{M_1 + M_{11}}x = -\frac{M_1 + M_{11} + M_{12}}{M_1 + M_{11}}\ddot{u}_g \quad (2)$$

ここで、

$$\beta = \frac{M_1 + M_{11} + M_{12}}{M_1 + M_{11}} : \text{応答低減係数}$$

式(2)より水中にある構造物の固有振動数は

$$\omega^2 = \frac{K}{M_1 + M_{11}}$$

に低下し、入力には β という応答低減係数がかかるという特性を有することがわかる。

水中構造物の水の自己付加質量による固有振動数の低下について、設計においては、米国機械学会 (ASME) のテーブル^[3]に基づき算出している。Fig.6 に試験と設計の付加質量による固有振動数の低下率を示す。ここで、固有振動数の低下率は、 f_1/f_0 (f_1 : 水中固有振動数、 f_0 : 気中固有振動数) により求める。市松ラックの水の自己付加質量による固有振動数低下が、設計条件より算定した固有振動数とほぼ同等である。

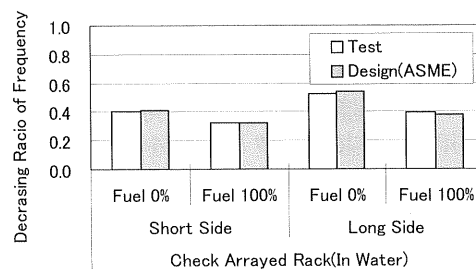


Fig. 6 Comparison between Test and Design in Decreasing Ratio of Frequency cause of Virtual Mass

4.2 取得減衰比の妥当性評価

取得した減衰比の設計減衰としての妥当性を確認するため、取得した減衰比を用いた設計解析で地震波加振試験結果を評価できるかどうかを検討した。設計解析の方法を以下に示す。

(1) 解析モデル

ラックはシェル要素でモデル化した。ラック固定部の剛性はバネ要素でモデル化し、このばね要素の剛性は、試験で得られた気中の固有振動数に解析モデルの固有振動数が合うように設定した。

(2) 解析方法

解析方法は現行の設計解析で用いられている応答スペクトル解析である。振動台上で計測した地震波と取得した減衰比を用いて計算した応答スペクトルを用いた。また、応答スペクトルは周期軸に対して±10%の拡幅を行っている。

水中にあるラックの自己付加質量 M_{11} は、設計と同様、米国機械学会 (ASME) のテーブル^[3]に基づき算定し、ラックの質量に加えた。式(2)の応答低減係数 β の分子の $M_{11} + M_{12}$ はラックの排除水の質量に相当し (M_{12} は相互付加質量)、負の値を取ることから、安全側の値となるように応答低減係数

$$\beta' = \frac{M_1}{M_1 + M_{11}}$$

を β' 倍することとした。

(3) 解析結果

Fig.7 に地震波加振時の市松ラック付根応力の試験結果と設計解析結果の比較を示す。設計解析結果は試験結果と同等の結果となっており、取得した減衰比を設計減衰比として用いることの妥当性が確認できた。

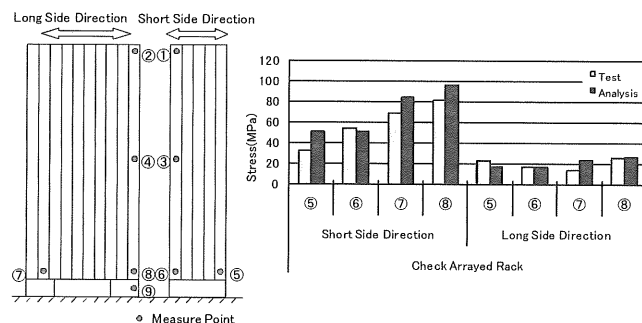
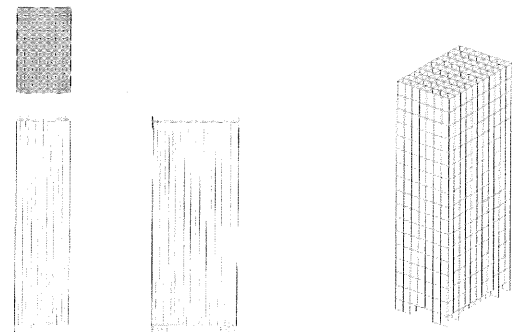


Fig. 7 Comparison of Test and Analytical Results (Check Arrayed Rack)

5. 実機ラックの耐震評価例

実機ラックの耐震評価例として取得した現実的な減衰比を適用し、実機ラックの解析を行った。Fig.8 に実機ラック構造概要図および解析モデルを示す。解析に適用する減衰比は 7%とする。比較として、同解析条件にて従来設計で適用している減衰比 1%を適用した解析についても実施した。実機ラックの解析評価において最大応力の発生部位となること

多い、床との固定ボルト部の応力計算例を Fig.9 に示す。本解析評価により、現実的減衰定数を適用することで、実機ラックの余裕が十分確保されていることが確認された。



component drawing analytical model
Fig. 8 Component drawing and analytical model of the actual Check Arrayed Rack

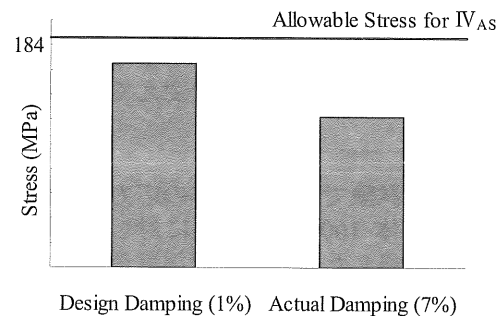


Fig. 9 Analysis result of the Rack using actual damping (Anchor Bolt)

6. 結言

- 1) 実機ラックの水中での振動試験を実施し、7.6%程度の減衰比が確認された。また、流体の付加質量効果による固有振動数の低下率が試験と設計でほぼ同等であることを確認した。
- 2) 振動試験で取得した減衰比を適用して地震波加振試験の解析評価を実施し、試験結果と同等の結果となることを確認し、試験によって得られた減衰比の妥当性を確認した。
- 3) 現実的な減衰比として7.0%を適用し、ラックの応力解析を実施した。設計減衰1%での応力に対して応力値が低減し、実機ラックにおける余裕が確保されていることを確認した。

参考文献

- [1] 大型耐震実験施設 (LARGE-SCALE EARTHQUAKE SIMULATOR)パンフレット、独立行政法人 防災科学技術研究所
- [2] Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary (ASCE 4-98), ASCE
- [3] K. T. Patton : Table of Hydrodynamic Mass Factors for Translational Motion, ASME